

# 水利施工中软土地基处理的方法研究

董 强

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

**摘 要:** 软土地基因其高含水量、高压缩性、低承载力及较差的抗剪强度等不良工程特性,对水利工程施工安全与结构稳定性构成严重威胁。本文系统梳理了软土地基的基本特征及其在水利工程中的危害表现,深入分析了当前主流的地基处理技术,包括换填垫层法、预压排水固结法、强夯法、振冲碎石桩法、水泥土搅拌桩法、高压喷射注浆法以及新型复合地基技术等。通过对比各类方法的适用条件、加固机理、施工要点及经济性,探讨了不同工况下地基处理方案的选择原则。最后,针对当前地基处理中存在的问题,提出未来发展方向,包括智能化监测、绿色低碳材料应用及多技术协同优化等,以期为水利工程建设提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 水利工程;软土地基;地基处理;复合地基;固结沉降;施工技术

## 引言

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分,承担着防洪、灌溉、供水、发电、航运等多重功能。其结构物(如堤坝、水闸、泵站、渠道等)通常规模大、荷载重、使用年限长,对地基的稳定性与变形控制要求极高。然而,在我国东部沿海、长江中下游、珠江三角洲及部分内陆湖泊区域广泛分布着深厚的软土层。这类土体具有天然含水量高(常超过液限)、孔隙比大( $> 1.0$ )、压缩性强、渗透性差、抗剪强度低等特点,若未经有效处理直接在其上修建水利工程,极易引发不均匀沉降、边坡失稳、结构开裂甚至整体滑移等工程事故,严重影响工程安全与使用寿命。因此,软土地基处理是水利工程施工中的关键技术环节。如何根据工程特点、地质条件、环境约束及经济成本,科学选择并优化地基处理方案,成为保障水利工程质量与安全的核心课题。

## 1 软土地基的工程特性及危害

### 1.1 软土的定义与分类

根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001),软土是指天然含水量大于液限、天然孔隙比大于或等于1.0、不排水抗剪强度小于30kPa的细粒土,主要包括淤泥、淤泥质土及部分冲填土、杂填土等。按成因可分为滨海相、湖沼相、河滩相及谷地相软土,其中滨海相软土分布最广、厚度最大、工程性质最差。

### 1.2 主要工程特性

软土含水量常达40%~90%,孔隙比普遍大于1.0,甚至可达2.0以上,导致土体结构松散,骨架强度低。压缩系数 $a_{1-2}$ 通常大于 $0.5\text{MPa}^{-1}$ ,属高压缩性土。在荷载作用下产生显著的主固结沉降,且次固结持续时间长。水平与垂直渗透系数均较小( $k \approx 10^{-7} \sim 10^{-9}\text{cm/s}$ ),排水固

结速率慢,导致沉降历时久。不排水抗剪强度 $c_u$ 一般为5~20kPa,内摩擦角 $\phi$ 接近 $0^\circ$ ,易在剪切应力下发生塑性流动。软土具有天然结构(絮状或蜂窝状),扰动后强度显著降低;同时表现出明显的蠕变特性,长期荷载下变形持续发展。

### 1.3 在水利工程中的主要危害

导致水工建筑物(如闸墩、泵房)倾斜、开裂,影响设备运行与结构安全。无法支撑上部结构荷载,引发局部或整体失稳。堤防、渠坡在自重或水位变动下易发生滑坡。软土层常夹有薄砂层,形成渗流通道,可能诱发管涌、流土等渗透破坏。填筑过程中易出现“弹簧土”现象,难以压实,影响施工进度与质量。

## 2 软土地基处理的主要方法

### 2.1 换填垫层法

换填垫层法核心思想是将基础底面以下一定深度范围内的软弱土体全部或部分挖除,代之以强度高、压缩性低、透水性好且性能稳定的材料,如中粗砂、碎石、灰土或工业废渣等,形成人工垫层。该垫层一方面通过自身较高的模量扩散上部荷载,减小传递至下卧软土层的附加应力;另一方面作为良好的排水通道,加速软土固结;同时还能提高地基表层整体承载能力。此方法适用于软土层厚度较薄(一般不超过3米)、地下水位较低或易于采取降水措施的工程场景。其最大优势在于施工工艺简单、效果直观、工期短,特别适合小型水工建筑物或临时施工平台的地基处理<sup>[1]</sup>。然而,该方法也存在明显局限:开挖产生的大量弃土需妥善处置,易造成环境负担;回填材料需求量大,若运距较远则成本显著上升;更重要的是,它仅能改善浅层地基性能,对深层软土无能为力,故在深厚软土地区应用受限。施工过程中

需严格控制分层回填厚度（通常不超过30厘米）、压实度（一般要求 $\geq 95\%$ ）及垫层宽度，以确保应力有效扩散并防止侧向挤出。

## 2.2 预压排水固结法

预压排水固结法基本原理是通过施加预压荷载，促使软土孔隙水排出，土骨架逐渐压密，从而提高强度、降低压缩性、减少工后沉降。为克服软土天然渗透性差的缺点，工程中常辅以竖向排水体（如砂井或塑料排水板）构成“排水+加载”系统，显著缩短固结时间。根据加载方式不同，可分为堆载预压法、真空预压法及二者结合的联合预压法。堆载预压利用土石方堆载提供超载压力，适用于场地开阔、填料充足的项目；真空预压则通过铺设密封膜并抽真空，在膜下形成约80kPa的负压，等效于8米水柱荷载，无需堆载、节省填料，且荷载均匀、无侧向挤出风险，特别适合临水或空间受限区域。联合预压则兼顾两者优势，适用于工期紧、沉降控制严的大型工程。该方法能有效控制总沉降与差异沉降，提升地基整体稳定性，且无需大量外来材料。但其主要缺点是工期较长，需数月甚至数年才能完成固结，且必须配套完善的沉降与孔隙水压力监测系统以指导卸载时机。施工关键在于合理设计预压荷载大小与持续时间、科学布置排水板间距（通常1.0–1.5米），并通过实时监测数据动态调整施工参数，确保固结度达到设计要求。

## 2.3 强夯法

强夯法利用起重设备将重达10至40吨的夯锤提升至6至20米高度后自由落下，对地基施加强大的冲击能量，使土体在瞬间高应力作用下发生强制压密、挤密，同时冲击波在土中传播形成裂缝网络，有利于孔隙水排出，从而提高地基密实度与承载力。该方法设备相对简单、施工速度快、成本较低，且加固深度可达10米以上，适用于处理碎石土、砂土、低饱和度粉土及部分黏性土地基<sup>[2]</sup>。然而，对于高含水量的饱和软黏土，强夯效果往往不佳，冲击能量易被水吸收，反而可能使土体结构破坏形成“橡皮土”，强度不升反降。因此，在软土地区应用强夯时，常需先铺设一定厚度的砂垫层以改善排水条件，或配合降水措施降低地下水位。此外，强夯施工会产生强烈振动与噪音，对周边既有建筑、管线及生态环境可能造成干扰，需设置隔振沟或控制夯击参数。工程实践中，需通过现场试夯确定最优夯击能、夯点布置形式、夯击遍数及间歇时间，并以最后两击的平均夯沉量作为停夯控制标准，确保加固效果的同时避免过度扰动。

## 2.4 振冲碎石桩法

振冲碎石桩法是利用振冲器的高频振动和高压水射

流在软土中成孔，随后分批填入碎石并振密，形成连续密实的碎石桩体。这些桩体与周围软土共同构成复合地基，通过桩体的置换、挤密和排水作用，显著提高地基承载力、减小沉降并加速固结。该方法施工效率高、无泥浆污染、对环境影响较小，且碎石桩本身具有良好的透水性，可作为竖向排水通道。其适用于处理黏性土、粉土及砂土地基，但对于极软的淤泥（如 $c_u < 5\text{kPa}$ ），成孔过程中易发生缩颈或塌孔，成桩质量难以保证。施工中需严格控制振冲器的加密电流、留振时间及填料量，以确保桩体密实度。典型桩径为0.7至1.2米，桩间距1.5至2.5米，呈梅花形或正方形布置。值得注意的是，振冲施工可能导致地面隆起，尤其在软土较厚区域，需通过合理布桩顺序和设置排水措施加以控制。该方法在堤防、渠道等线性水利工程的地基加固中应用广泛，效果良好。

## 2.5 水泥土搅拌桩法

水泥土搅拌桩法通过特制的深层搅拌机械将水泥浆（湿法）或干粉（干法）与软土强制搅拌，使水泥与土体发生水化、水解反应，形成具有一定强度和低渗透性的水泥土桩。这些桩体可按格栅状、条带状或满堂式布置，形成整体性良好的加固区，既能提高承载力，又可作为防渗帷幕。该方法无振动、无噪音、对周边环境扰动小，特别适用于城市或邻近敏感设施的水利工程。其适用土层包括淤泥、淤泥质土、粉土及黏性土，但对有机质含量过高（ $> 10\%$ ）或pH值过低的酸性土，水泥固化反应受抑制，加固效果显著降低。施工关键在于精确控制水灰比（通常0.45–0.55）、水泥掺入量（12%–20%）及搅拌提升速度（ $\leq 0.5\text{m/min}$ ），以确保桩体均匀性和强度。尽管该方法效果可靠，但水泥用量大，成本较高，且深层搅拌的均匀性受设备性能和操作水平影响较大。近年来，为降低成本并提升环保性能，工程中开始尝试掺入粉煤灰、矿渣等工业废料替代部分水泥，取得良好效果。

## 2.6 高压喷射注浆法（旋喷桩）

高压喷射注浆法是通过钻杆底部的特殊喷嘴喷射出压力高达20至40MPa的水泥浆液，利用其高速射流切割、破碎并搅拌周围土体，同时钻杆旋转并缓慢提升，最终形成圆柱状的高强度水泥土加固体。根据喷射介质组合不同，可分为单管法（仅喷浆）、双管法（浆+气）和三管法（浆+气+水），后者形成的桩径最大（可达2米）。该方法几乎适用于所有类型的软弱土层，尤其擅长处理含有孤石、障碍物或需要局部托换加固的复杂地层。其加固体强度高（可达5MPa以上），形状规则，可垂直、倾斜甚至水平施工，在水闸底板防渗、泵站基础托换、

堤防渗漏封堵等关键部位应用广泛<sup>[3]</sup>。然而,该技术造价高昂,施工过程中会产生大量返浆,需妥善处理以防环境污染,且在卵砾石层中因射流能量被粗颗粒吸收,加固效果大打折扣。施工控制重点在于精确调节喷射压力、提升速度与旋转速度,确保桩体直径与强度满足设计要求。

### 2.7 新型复合地基技术

面对日益复杂的工程需求与更高的性能标准,单一地基处理方法往往难以兼顾承载力、沉降控制、工期与成本等多重目标,由此催生了多种新型复合地基技术。例如,CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)通过掺入粉煤灰和石屑,在降低水泥用量的同时获得介于刚性桩与柔性桩之间的力学性能,经济高效;PCC桩(现浇混凝土薄壁管桩)兼具高承载力与内部排水通道功能,适用于深厚软土;在路堤或堤防工程中,采用EPS(聚苯乙烯泡沫)等超轻质填料结合桩网复合地基,可大幅减小附加荷载,有效控制沉降。此外,前沿研究正探索微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)等生物矿化技术,利用微生物代谢活动在土颗粒间生成胶结物质,实现绿色、低扰动的原位加固。尽管此类生态工法尚处于实验室或小规模试验阶段,但其低碳、可持续的特性代表了未来地基处理的重要发展方向。

## 3 处理方法选择与优化建议

### 3.1 方法选择

软土地基处理方案的选择绝非简单的技术套用,而是一项需综合权衡多维因素的系统决策过程。首要依据是详尽的工程地质勘察资料,包括软土层的厚度、分布、物理力学参数及地下水状况;其次需紧密结合上部结构的荷载特征、沉降控制标准及功能要求;同时,施工工期、场地条件、设备可得性、材料供应及成本预算等现实约束亦不可忽视<sup>[4]</sup>。此外,现代工程越来越强调环境友好性,施工过程中的振动、噪音、弃土、碳排放等环境影响也应纳入考量。理想的处理方案应在确保安全可靠的前提下,实现技术可行、经济合理与生态协调的统一。

### 3.2 优化建议

为提升软基处理的科学性与精准度,未来优化方向应聚焦于几个关键领域:一是推动精细化勘察,采用静力触探(CPTU)、旁压试验等先进手段获取连续、高分辨率的地层参数;二是强化数值模拟在方案比选与参数优化中的作用,利用PLAXIS、MIDAS/GTS等岩土有限元软件对沉降、稳定性和施工过程进行全过程仿真;三是推行信息化施工与动态设计,基于自动化监测数据(如沉降、孔压、侧向位移)实时反馈调整施工参数,实现“监测—分析—决策—调整”的闭环管理;四是大力推广绿色低碳技术,如利用粉煤灰、矿渣等工业固废替代部分水泥,研发低能耗施工工艺,探索生物加固等新型生态工法,助力水利工程建设迈向可持续发展。

## 4 结语

软土地基处理是水利工程安全高效运行的关键。本文论述了软土特性及其引发的沉降、失稳等危害,评析了从传统到现代的主流处理方法及其机理、适用条件与实践要点。研究表明,单一技术难以满足日益多样化和高标准的工程需求,复合地基技术融合多学科理念将成为主流。展望未来,软基处理技术将围绕“智能化、绿色化、高效化”发展:利用物联网、BIM和大数据实现智能监控与动态优化;采用新材料、新工艺降低资源消耗与碳排放,推动绿色发展;探索微生物加固等颠覆性技术,拓展处理边界。唯有持续创新,深化理论与实践结合,才能有效攻克软土地基难题,为国家水网建设与水安全提供坚实支撑。

## 参考文献

- [1]傅文忠.水利施工中软土地基处理的方法[J].黑龙江水利科技,2020,48(09):148-150.
- [2]王红东.水利工程施工中软土地基处理技术应用分析[J].地下水,2025,47(05):266-267+289.
- [3]王浩,耿玉芝,李福.水利工程施工中软土地基处理技术研究[J].水上安全,2025,(09):185-187.
- [4]张腾,王大伟.浅谈水利工程施工中软土地基处理技术[J].治淮,2025,(03):49-50+67.